

**Физические свойства функции и числа эмпирической макротвердости материала.
Универсальная физическая единица измерения макро твердости. Part 2.**

Shtyrov Nikolay

Private Research and production Company «LYU». Nikolayev, Ukraine, +380675102044,

E-mail: nasht@ukr.net

Abstract: Результаты аналитических исследований физических свойств функции и числа эмпирической макротвердости на основе стандартной экспериментальной силовой диаграммы кинетического макроиндентирования сферой. Предложены аналитический метод сравнения, критерий подобия физической и эмпирической макротвердости материала. Показаны физические свойства процесса измерения твердости методом Калверта-Джонсона. Рассмотрены физические причины размерного эффекта при измерении макротвердости. Обоснована универсальная физическая единица и эталон макротвердости кинетического макроиндентирования сферой.

Ключевые слова: физическая теория кинетического индентирования, физическая макротвердость, метод определения, физическая единица макротвердости материала.

1. Функция и число эмпирической макротвердости, физические свойства. Метод сравнения значений физической и эмпирической макро твердости.

Рассмотрим на примере индентирования сферой свойства функции $HI(h)$ и числа эмпирической макротвердости материала используя физический анализ. Обсудим причину размерного эффекта. Подробно результаты изложены в [1]. На Рис. 1а, диаграммы эмпирической твердости, полученные по формуле $HI(h)=F(h)/S(h)$. На Рис.1б характерный вид физической диаграммы кинетического индентирования (KI), построенной по результатам аналитической обработки функции $F(h)$, здесь сферический индентор разного диаметра, стандартные меры твердости HB103 и HB411. $S(h)$ – условная площадь контакта и распределения действия силы F на материал. $HI(h)$ – эмпирическая твердость по Бринеллю, имеет условную размерность N/m^2 , это условное давление или условное напряжение сжатия на поверхности контакта. Обычно площадь $S(h)$ определяется формулой предложенной в методике измерения твердости. В расчетах твердости применяют условные геометрические характеристики поверхности созданной в процессе вдавливания тела индентора в материал. Формулы определяют площадь условной поверхности вмятины или отпечатка (вмятина после снятия силы F), проекцию поверхности и др. Все формулы расчета площади S приближенные, условные, эмпирические, не имеют корректной физической связи с внутренними необратимыми процессами преобразований структуры материала. Модели пластических деформаций материала относятся к теории механики деформированного твердого тела, в них нет статистической физики. Задача физической теории установить связь изменений

структурно-энергетических параметров материала и эмпирических параметров (F,S,V,h) кинетического индентирования. На примере метода Бринелля рассмотрим связь числа и функции эмпирической и физической твердости.

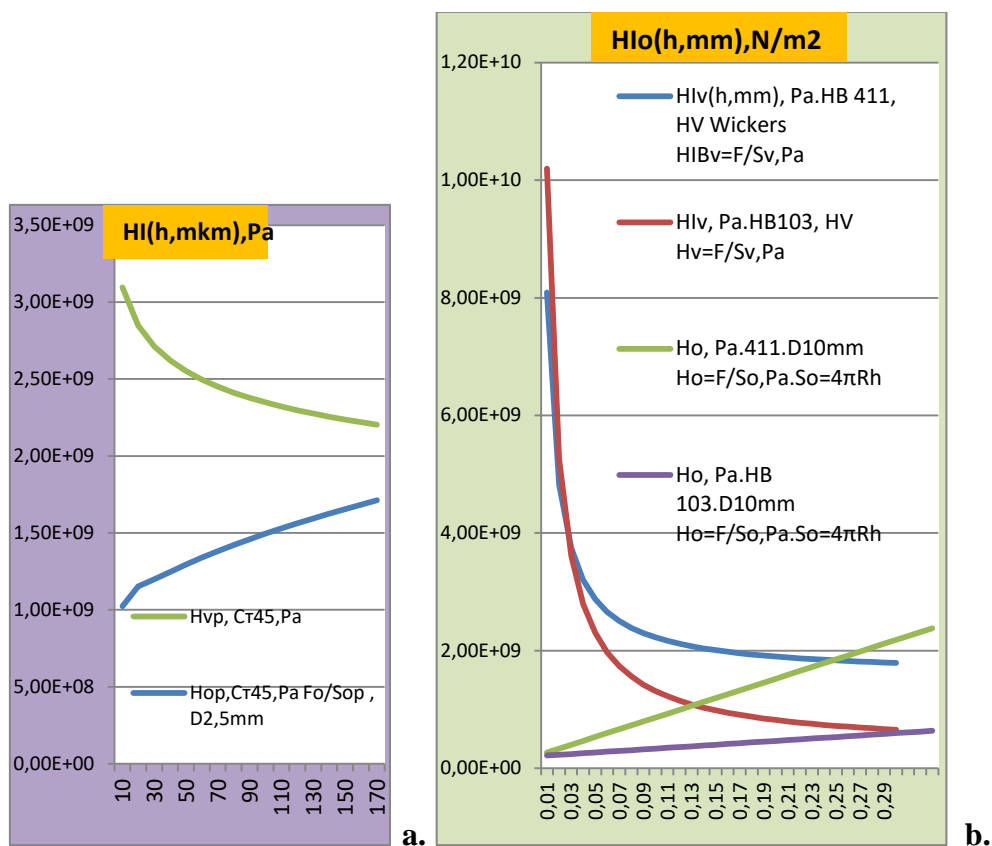


Рис. 1. Кинетическое макро индентирование сферой и пирамидой. Диаграммы $HI(h)$ эмпирической макро поверхностной твердости: **а)** Экспериментальные. Верхняя кривая пирамида Виккерса, нижняя сфера Бринелля D2,5mm. Сталь 45, данные [2]; **б)** Расширенный диапазон диаграммы $HI=F/So$, эмпирическая твердость, (9.6) HB103/411, D10mm, pyramid Wickers, построены аналитически, исходные данные [1].

В [3] получена формула (1) для градиента плотности поля энергии термомеханического потенциала индентирования $gradA$ на поверхности активированного объема. Так же мы обозначили, что градиент потенциала индентирования - **физическая макро твердость ламинарного индентирования материала**. В декартовых координатах полное приращение $gradA$ активированного объема это сумма частных дифференциалов, назовем их компоненты градиента потенциала плотности:

$$gradA = \frac{\partial A}{\partial V_x} + \frac{\partial A}{\partial V_y} + \frac{\partial A}{\partial V_z} = PHl_x(h) + 2PHl_z(h) \quad (1)$$

Форма индентора (сфера, пирамида и др.) влияет на величину каждой компоненты $PHl_{xy,z}(h)$. Величина приращения компоненты зависит от оси координат и формы поверхности активированного объема, соответственно и формы индентора. Согласно теории градиента [4], каждая компонента характеризует приращение плотности энергии потенциала A на поверхности S активированного объема. Следовательно, каждая

компонента градиента (1) характеризует изменение плотности энергии в направлении выбранной оси. В направлении каждой оси имеем определенную удельную обобщенную мощность $P_{HM}_{x,y,z}(h, HB)$. Компонента потенциала физической твердости зависит от выбранного направления, глубины, твердости материала и формы индентора. Обозначим $P_{Hx}(h, HB)$ - **главная компонента градиента обобщенной мощности макро индентирования** материала в направлении h . Исследуем главную компоненту градиента потенциала в направлении движения индентора, ось X , $h = x$. **Объемный частный дифференциал** A_x по h (ось X):

$$P_{Hx}(h, HB) = \frac{\partial A_x}{\partial V_x} = \frac{\partial A}{V'_p(h)\partial h} = \frac{A'(h)\partial h}{V'(h)\partial h} = \frac{A'(h)}{V'(h)} = \frac{F(h)}{V'_o(h)}, N/m^2 \quad (2)$$

$$\text{Где, } A' = \partial A / \partial h = F(h), \quad \partial V_x / \partial h = V'(h). \quad (3 \text{ 9.2})$$

Для ламинарного макро индентирования $A_x = \mu A$, μ - параметр влияния формы и направления оси на функцию $S_{x,y,z}(X, Y, Z)$ компоненты площади поверхности индентора, для сферы, $h \gg 0$, приближенно примем $\mu \approx 1$, получим $A_x \cong A$.

Из аппроксимации функции $F(h)$ полиномом, для сферы и пирамиды [1] имеем:

$$F(h) = ah^m + bh^{m-1} + c \quad (4 \text{ 9.3})$$

Где, a, b, c, m – константы аппроксимации $F(h)$. В работе [5] для макро **KI** шаром Бринелля и пирамидой Виккерса, для стандартных мер твердости установлено: $m = 2$, значения $a = a_o$, $b = b_o$, $c = 0$. Из (2),(3), (4) получим в общем виде:

$$P_{Hx}(h, HB) = \frac{\partial A_x}{\partial V_x} = \frac{F(h)}{V'_o(h)} = \frac{F(h)}{2\pi Rh} = \frac{F(h)}{S_{ax}} = \frac{a_o h^2 + b_o h}{2\pi Rh} = \frac{a_o h}{2\pi R} + \frac{b_o}{2\pi R}, N/m^2, \quad (5 \text{ 9.4})$$

$$\text{Где, } V'_o = \partial V_o / \partial h = 2\pi Rh = S_{ax}.$$

Подставим частную производную $V'_o = S_{ax}$ в (2) получим:

$$P_{Hx}(h, HB) = \frac{\partial A}{\partial V_x} = \frac{\partial A}{V'_p(h)\partial h} = \frac{\partial A}{S_{ax}\partial h}, N/m^2 \quad (6 \text{ 9.5})$$

Из (6) очевидно, что главная компонента физической твердости или компонента обобщенной мощности индентирования функция $P_{Hx}(h, HB)$ - **удельное количество градиента потока энергии**, следовательно, значение определяется на единицу площади $S_a(h)$. Из (6) очевидно, что главная компонента градиента индентирования зависит от совершенной работы и площади контактной поверхности (соответственно от глубины). Таким образом, возможны два варианта представления компоненты градиента мощности или **компоненты физической твердости** макро KI (2) и (5). Рассмотрим их детально:

Первый вариант. Размерность объемного дифференциала физической твердости индентирования J/m^3 , (7). Для формул сферы, (2), (5) в результате преобразований физическая размерность J/m^3 **вырождается (сокращается)**, получим **размерность эмпирической твердости** N/m^2 . Поэтому в формулах (5),(6) размерность условных напряжений. Формулы (2), (5), преобразуются в эмпирическую формулу твердости $HI(h)$

$$PHI_x(h, HB) = \frac{\partial A_x}{\partial V_x} = \frac{\partial A}{S_a \partial h} = \frac{F(h)}{2\pi R h} = \frac{F(h)}{S_{a0}(h)} = HI(h), N/m^2, \text{ Где, } S_a(h) = \delta\pi R h$$

Окончательно эмпирическая твердость – главная **компонента градиента обобщенной объемной мощности макро индентирования** $\partial A / \partial h$, **деленная на площадь** $S_{ax}(h)$:

$$PHI_x(h, HB) = HI(h), N/m^2, (7.9.6)$$

Таким образом, эмпирическая твердость это дважды удельный показатель. **Эмпирическая твердость зависит от** плотности энергии A рассеянной в объеме V_0 и градиента плотности энергии на поверхности активированного объема, перемещенного в направлении оси $h-X$ и измененного по форме. Это главная компонента градиента (6) физической твердости, она равна эмпирической твердости (7). Характеризует изменение плотности энергии индентирования, при переходе от активированного объема к внешней области индентируемого материала, в направлении оси движения.

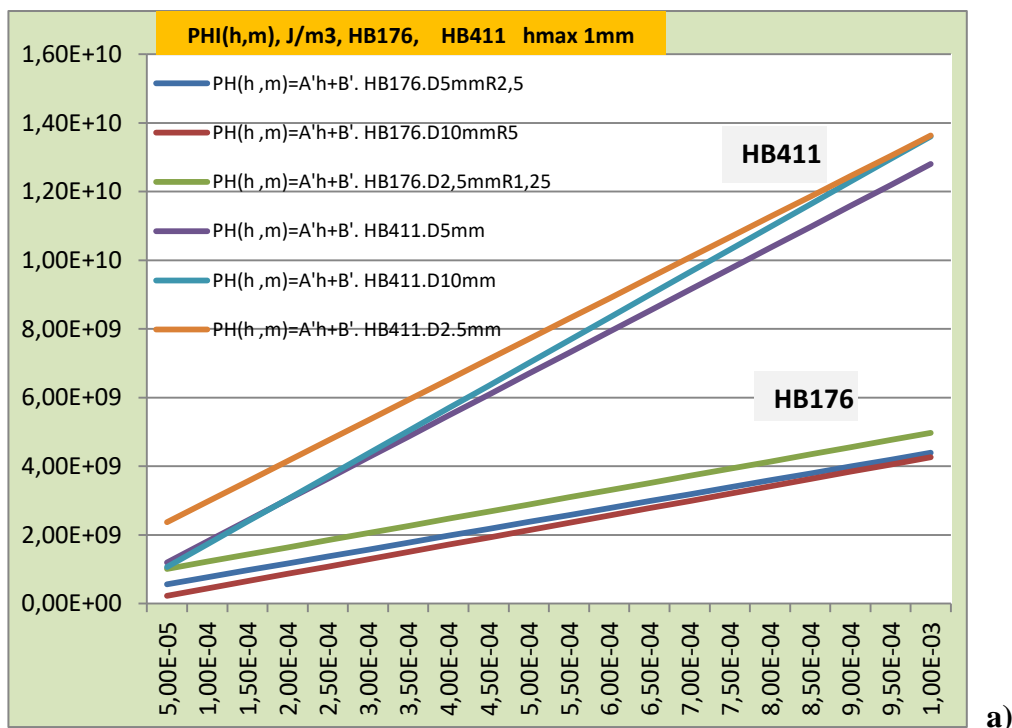
Второй вариант. Развернутая формула **компоненты физической твердости** KI сферой. Показывает связь с главными параметрами аппроксимации a_0, b_0 в функции $F(h)$, (4):

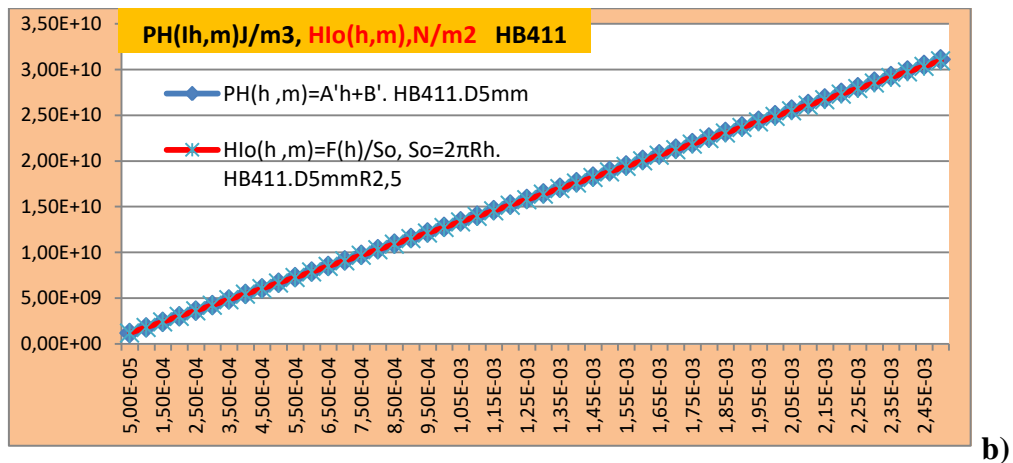
$$PHI_x(h, HB) = \frac{\partial A(h)}{\partial V_a(h)} = \frac{a_0 h}{2\pi R} + \frac{b_0}{2\pi R}, N/m^2 \quad (8)$$

Подведем итог. Частный дифференциал по оси X (так же h) тензора это $PHI_x(h, HB)$, (6), (7),(8) представляет одновременно функцию эмпирической твердости материала в методе Бринелля. В этой функции присутствует одна главная компонента (6) от градиента (1). Эмпирическая твердость – удельная характеристика потока работы напряжений. В процессе роста глубины h величина **значения эмпирической твердости**, главная **компонента градиента** для сферы **непрерывно линейно растет**. На Рис.2а пример $PHI(h, HB)$ для материала разной твердости. На Рис.2b вместе показаны $HI(h)$ функция **эмпирической твердости** и функция $grad A_x = PHI_x(h, HB)$ компонента градиента, меры твердости HB411, сфера D5mm. Функции физической и эмпирической твердости одного материала (стандартной меры) совпадают. От твердости зависит угол наклона линейной функции $PHI(h, HB)$ и $HI(h)$.

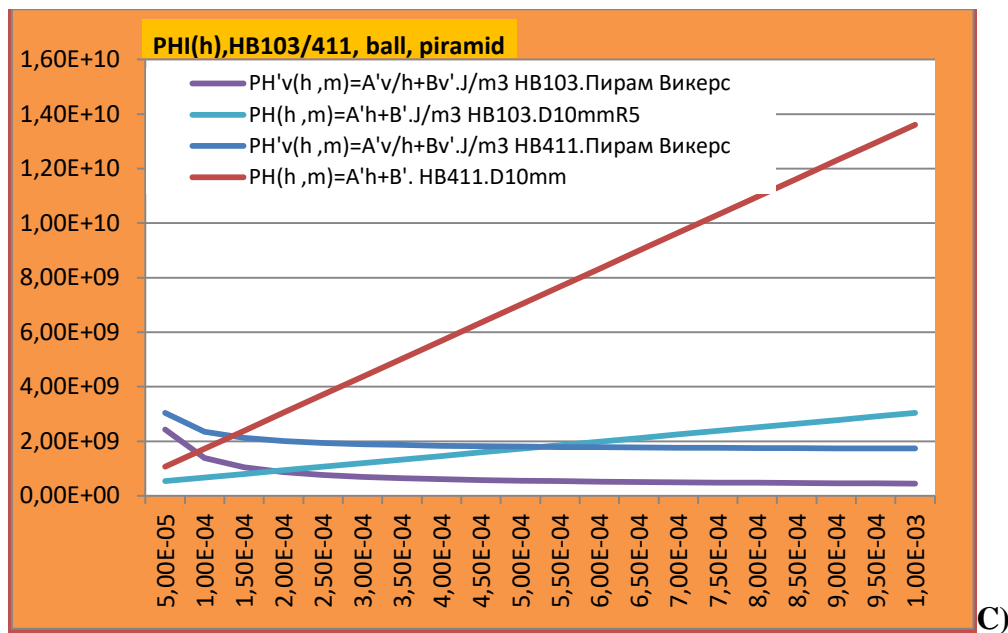
2. Критерий подобия для измерений физической и эмпирической макротвердости. Эталон макротвердости индентирования сферой.

На Рис.2а показаны характерные функции $\Phi H(h, HB)$ для разной меры твердости HB176/411. Для одной меры твердости, независимо от диаметра, графики функций практически совпали. Для одной меры HB_i функция эмпирической твердости или компонента градиента физической твердости $\Phi H(h, HB_i)$ инвариантны диаметру сферы, линии для трех разных диаметров D практически совпали. На Рис.2б показаны вместе функции $\Phi H(h, HB_i)$ и эмпирическая твердость $HI_o(h)$ для меры HB411, они совпадают. Значение функции или число твердости, мы вычисляем для определенной глубины h . Величина, число твердости зависит от выбранной координаты – глубины индентирования h . Из анализа следует, что для **однозначного и корректного определения числа эмпирической твердости** материала, необходимо обеспечить одинаковые **физические условия или подобие** процессов испытаний материала разной твердости, учитывать форму инструмента и глубину h . В данном случае, имеем макро индентирования сферой, **подобие физических условий** обеспечено при **одной заданной глубине h_{st} , независимо от диаметра сферы**. Для сферы эталоном при измерении твердости является - постоянная глубина индентирования. Одновременно это первое условие подобия физического процесса макро индентирования. На Рис.2Д показан принцип определения значений эталонной твердости разных материалов макро индентором. При условии $h_{st} = h$ соблюдается физическое подобие процессов, для разных материалов, в данном случае стандартные меры твердости. В Таблице 1 показаны результаты расчета числа физической твердости для условного стандартного постоянного значения глубины индентирования $h_{st} = 0.25mm$.





b)



c)

Рис. 2 Функция физической и эмпирической макро твердости **KI**: а) физическая твердость $PH(h, HB, D_n)$, стандартная мера твердости HB176, HB411, диаметр D10/5/2.5 mm, по данным [1].; б) вместе показаны $PH(h)$ и $PH(h)$, HB411, D5/2.5 mm; в) Диаграммы $PH(h)$ сферы и пирамиды Виккерса.

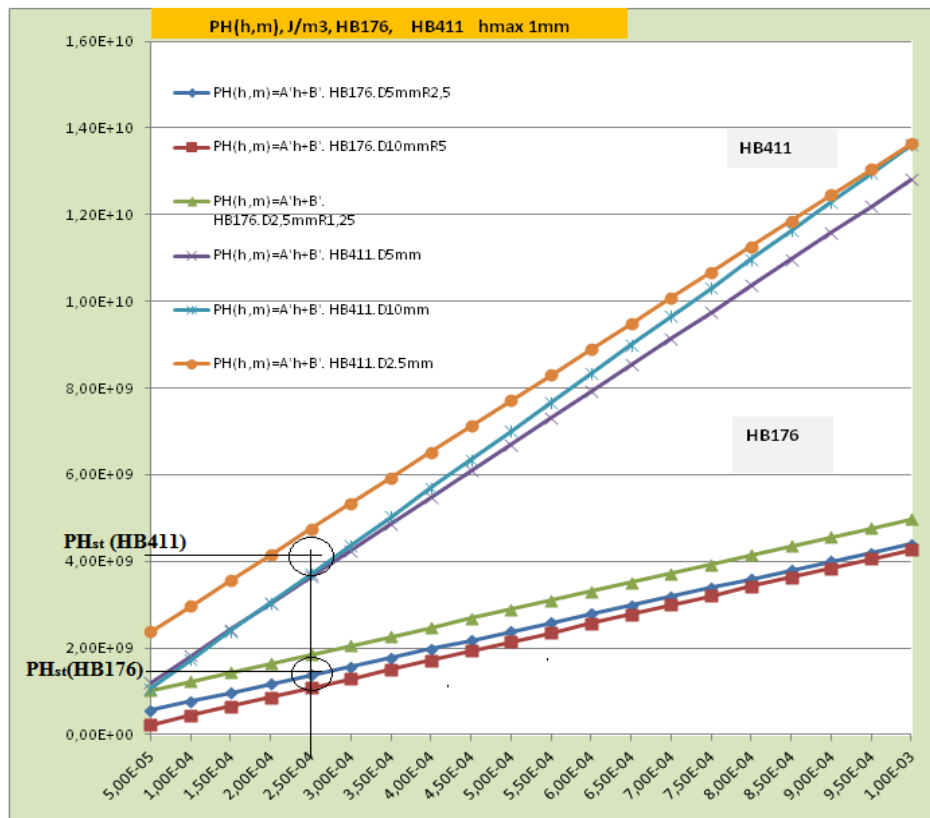


Рис.2D Определение значения эталона физической – эмпирической твердости, используя экспериментальные диаграммы физической твердости $PH(h)$, для стандартных мер HB176, HB 411, инденторы сфера $D=10,0/5,0/2,5mm$. Значение эталона физической твердости PH_{st} , приблизительно равно твердости стандартной меры. Эталон глубина $h_{st} = 0.25mm$.

На Рис.2с функции твердости $PH(h)$, мера HB103, индентор сфера и пирамида Виккерса. У пирамиды (так же у конуса) функция имеет вид гиперболы, при изменении твердости график смещается, особенности процесса СИ острым индентором рассмотрены в [5]. Из свойств функции и определения физической твердости видим, подобие выполнено, если индентор в процессе движения СИ генерирует *одинаковую удельную величину площади поверхности* $\Delta S_a / \Delta V_a, 1/m$, для *разного материала и разной формы индентора*. Расчет и сравнение числа твердости разных материалов, инденторов, следует выполнять при физико-механическом подобии условий - *одинаковый прирост площади поверхности на единицу активированного (вытесненного) объема V_a* . Такие условия измерения твердости материала впервые создали Кальверт – Джонсон (1859г) [5,6]. В работе [5], для проверки соответствия условию подобия процесса макро КИ, предложена обобщенная физико-механическая характеристика (9) **функция формоизменения материала**:

$$X_{SV}(h) = \frac{S_a(h)}{V_a(h)} \quad (9)$$

$X_{SV}(h)$ - удельная площадь созданной (генерированной) поверхности на единицу активированного в процессе КИ объема материала. Значение функции, в общем случае, зависит от формы индентора и перемещения h . У сферы функция (9) имеет особое

свойство (10), она не зависит от R, но зависит от глубины индентирования h и параметра δ в формуле контактной поверхности (δ определяется эмпирической методикой):

$$X_{Sv_0}(h) = \frac{S_{a_0}(h)}{V_{a_0}(h)} = \frac{\delta \pi R h}{\pi R h^2} = \frac{\delta}{h}, \quad \delta = 2 \div 4 \quad (10)$$

Для пирамиды: $X_{Sv}(h) = \frac{\lambda}{h}, \quad (11 \text{ 10.2})$

Где, λ - параметр учитывающий влияние формы пирамиды $S_a = \lambda h^2$. Для пирамиды Виккерса $\lambda = 3,17$. На Рис.3 функции $X_{Sv}(h)$ для индентора сфера, пирамида и усеченного конуса.

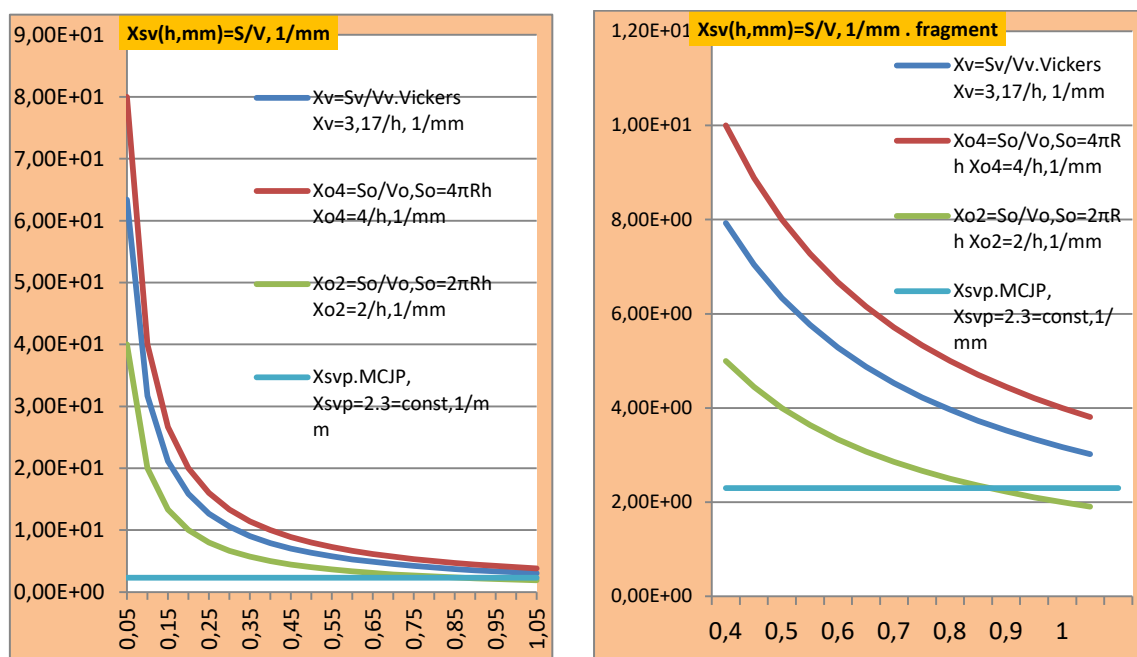


Рис. 3 6. Функция формоизменения $X_{Sv}(h)$ объема для пирамиды, сферы, конуса МСЖ. Для сферы $S_{a_0}(h) = \delta \pi R h$, $\delta=2, \delta=4$. Индентор усеченный конус, метод МСЖ, $X_{SvP} \text{ МСЖ} \approx 2,3 \text{.mm}^{-1} = \text{const}$

Значение $X_{Sv}(h)$ зависит от формы индентора и глубины h. На удельный показатель влияет формула расчета контактной поверхности $S_a(h)$, для сферы показан пример, две формулы $S_o(h)$. Условие подобия при измерении макротвердости:

$$X_{Sv}(h) = \text{const}, \quad (11 \text{ 10.3}).$$

В *первом физически корректном* методе измерения твердости, разработан в 1859г [6] Кальвертом – Джонсоном (обозначим **МСЖ**), использован индентор усеченный конус, эта форма имеет свойство $X_{Sv} \text{ МСЖ} \approx \text{const}$, Рис.3.

При измерении числа твердости в *ламинарном процессе КИ* удельная площадь поверхности *материала* должна быть одинаковая. В этом случае сохраняется подобие

процесса измерений **числа твердости и физически корректная шкала. На Рис.3а диаграммы $X_{SV}(h)$ видим, что условие подобия (11) приближенно выполняется, для сферы и пирамиды, если $h > 1.0\text{mm}$. С этой глубины $X_{SV}(h) \approx \text{const}$, физическая твердость мало зависит от глубины h , уменьшается влияние начального нелинейного участка, созданы условия для корректных измерений числа твердости KI.**

Значения эмпирической стандартной твердости НВ и потенциал физической твердости $R_{Hst}(HВ)$ совпадают (близкие), если потенциал определен в интервале который содержит значение h , при котором определена твердость НВ по стандарту Таблица.1. При этом значения параметра формоизменения $X_{SV}(h)$ близкие.

Из анализа функций макро кинетического индентирования Рис.1,2,3 следует, что физически корректное сравнение значений эмпирической твердости, в стандартных испытаниях возможно, если использован индентор одной формы (сфера может иметь разный D). При определении числа твердости нужна постоянная глубина h_{st} , Рис2D.

Для разной формы индентора, физически корректное сравнение числа макротвердости возможно только при одинаковом значении параметра $X_{SV}(h)$, одинаковая глубина не обеспечивает подобия. Физическое подобие измерений эмпирической твердости разных методов, инструментов и материалов выполняется при условии (11).

В табл.1 даны значения стандартной эталонной физической дифференциальной твердости R_{Hst} , определены формулой (3), (5), для $h_{st} = 0.25\text{mm}$, $D_i = 10/5/2,5\text{mm}$, три стандартные меры твердости НВ103/176/411 Физический эталон стандартной глубины $h_{st} = 0.25\text{mm}$ принят предварительно, для сравнительного анализа. В точке h_{st} значение R_{Hst} и эмпирическое число стандартной меры НВW твердости по Бринеллю приближенно равны. Размерности величин физической и эмпирической твердости формально сводятся к одинаковой величине.

Физическая твердость стандартных мер для разного диаметра сферы. Таблица 1.

Механическая мера твердости НВW	R_{Hst} средняя физическая твердость J/m^3	Значение эталонной физической твердости (9.4) $R_{Hst} J/m^3$, различная мера твердости НВ, диаметр 10/5/2.5 (D,mm). $h_{st} = 0.25\text{mm}$		
		(D2,5)	(D5)	(D10)
НВ411	$403 \cdot 10^7$	$4,74 \cdot 10^9$	$3,64 \cdot 10^9$	$3,71 \cdot 10^9$
НВ176	$145 \cdot 10^7$	$1,85 \cdot 10^9$	$1,37 \cdot 10^9$	$1,08 \cdot 10^9$
НВ103	$105 \cdot 10^7$	$1,11 \cdot 10^9$	$1,03 \cdot 10^9$	$1,07 \cdot 10^9$

Для выполнения условий подобия в стандартных методах **число твердости** следует определять для одинаковой формы инструмента и **постоянного значения глубины индентирования** h_{st} Рис. 4b . Если используется разная форма инструмента, то необходимо выполнить соответствующий корректирующий расчет, удовлетворить условию (11) [5]. В этом случае аналитически можно создать подобие измерений разными инструментами, выполнить переход к другой шкале твердости или перевод значений числа твердости, используя универсальную физическую единицу твердости. О влиянии разной формы индентора, диапазона на число твердости, подробнее в работе [5]. Благодаря форме индентора усеченный конус, в МСЖ подобие и условие (11) выполняются механически.

3. Физические свойства процесса измерения твердости методом Кальверта – Джонсона.

В работе [5] рассмотрен **физически корректный** метод измерения твердости, который создали Кальверт – Джонсон (1859г) [6]. Авторы МСЖ применили индентор в форме усеченного конуса, начальный диаметр контакта $d=1,25\text{mm}$, $X_{SV\text{МСЖ}} \approx 2,3 = \text{const}$. Эта форма индентора обеспечивает выполнение условия (11), $X_{SV}(h) \approx \text{const}$, см. диаграмму Рис.4a,b. Это свойство формы усеченного конуса, не материала. Таким образом, при измерении глубина h в МСЖ практически не влияла на число твердости. Формоизменение, образование поверхности, происходит приближенно при $X_{SV} \approx \text{const}$. Эксперимент МСЖ завершается в точке h_{st} , объем $V_a(h_{st})$. В МСЖ не измеряли площадь и глубину индентирования. Измеряли необходимый вес гирь для процесса медленного вдавливания, на заданную глубину h_{st} . Время испытаний всегда 30 минут. Скорость перемещения индентора приближенно постоянная, созданы условия близкие стационарной ползучести. Величина суммарного веса гирь с точностью до постоянного множителя равна работе индентирования. Вытесненный объем и площадь контактной поверхности вмятины одинаковые для разного материала. **Общий вес гирь для материала разной твердости различный. Но корневым, физическим показателем является удельная работа веса гирь. Вес пропорционален удельной работе (J/m^3) индентора.** Таким образом, в МСЖ опосредованно измеряется плотность энергии индентирования ($\Delta A/\Delta V$) материала. Первая шкала твердости МСЖ использует метод косвенного сравнения значений физической твердости. Удельная энергия вдавливания каждого рассматриваемого материала характеризуется индивидуальным весом груза, который необходим для образования одинакового для всех объема (глубины) вмятины. В результате мы получаем правильный метод. Разные материалы имеют разную плотность рассеиваемой энергии (разную обобщенную удельную мощность) при одинаковом изменении формы материала, в то же время данное испытание показывает разную твердость материала. В МСЖ размерного эффекта не было, поскольку физический процесс был одинаковым для материалов разной твердости, форма индентора обеспечивала постоянство удельной мощности процесса упругопластического формования. Оригинальная первая шкала была создана в единицах веса гирь; возникла единая «весовая» (обобщенная удельная энергия) правильная шкала твердости материалов от свинца до чугуна [6]. Остальные методы отступов затем были интуитивно настроены под этот масштаб. После этого авторы преобразовали энергетическую (весовую) шкалу твердости в безразмерную. Теоретического

физического определения твердости по методу Кальверта – Джонсона не было. Анализ этого метода [5] показал, что в нем был интуитивно создан базовый физический принцип макро instrumented indentation. Метод применялся более сорока лет. В последующих методах измерения твердости шкала МСJ поддерживалась эмпирически, искусственно. За этот период времени, по нашему предположению, сформировалось ошибочное мнение об отсутствии влияния на число твердости соотношения размеров активированного объема и площади контактной поверхности и др. В новых методах принцип подобия потерялся. Изменялись методы обработки данных механического акта, форма инструмента, алгоритмы измерения числа твердости (разные параметры геометрии, силы и др.). В результате закрепился не корректный эмпирический подход, в котором «искусственно» поддерживается первоначальная шкала твердости. Твердость (число) или потенциал физической удельной мощности формоизменения в МСJ не зависит от глубины перемещения инструмента h Рис. 4б, зеленые линии. Форма индентора и правила измерения в МСJ позволили авторам сформировать, **базовую корректную физическую шкалу твердости**. Она стала основой для последующих исследований и т.п. Сам физический принцип МСJ в последствие был необоснованно искажен.

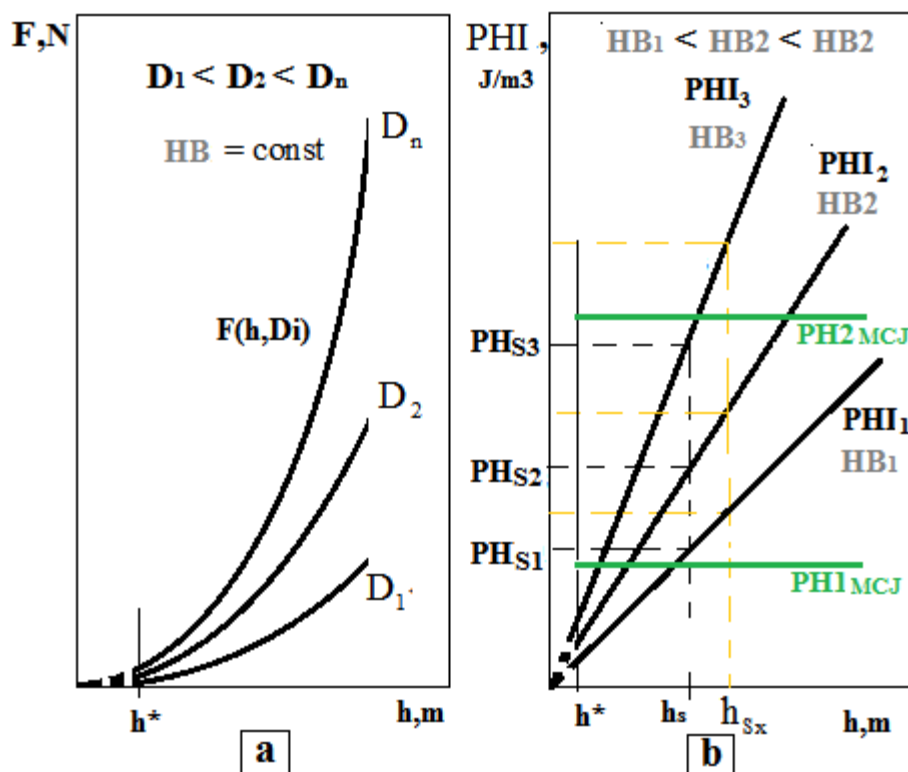


Рис.4. Обобщенные диаграммы идеального ламинарного макро процесса КИ шаром Бринелля и конуса МСJ: а) Функция $F_n(h, D_n)$ диаметр $D_1 < D_2 < D_n$, мера $HB_i = const$; б) функция $PHI_i(h, HB_i)$ и эталон PH_{Si} физической твердости каждой меры твердости HB_i , D - диаметр произвольный, $D > D_{min}$, $h < D$. Физические диаграммы КИ твердости $PH1_{MСJ}$, $PH2_{MСJ}$ метод Калверта и Джонсона, условный мягкий и твердый материал соответственно, $X_{SV}(h) = const$.

4. Обсуждение результатов.

В результате аналитического исследования свойств диаграммам КІ различных стандартных мер твердости найдена устойчивая характеристика твердого материала – физическая твердость $R_{HM}(V)$, Таблица 1. Главная компонента градиента физической твердости $R_{H_{st}}$, при условии физического подобия измерений, равна значению эмпирической твердости этого материала по шкале Бринелля Таблица 1. Некоторое расхождение значений твердости для разного подхода, результат применения приближенных методов аппроксимации и малого количества данных экспериментов. Вместе с тем аналитически показан устойчивый и основополагающий характер взаимосвязи функций физической твердости КІ и эмпирической твердости.

Из анализа результатов расчета потенциала физической твердости установлено, что это постоянная величина, объективная физическая характеристика для данного материала. В широком интервале значений h потенциал $R_{HM}(V)$ численно равен единственному значению компоненты потенциала физической твердости $R_{H_{st}}$, одновременно он численно равен эмпирической твердости НВ данного материала (стандартной меры) в условиях физического подобия. Величина потенциала $R_{HM}(V)$, не зависит от траектории процесса $F(h)$. Свойство экспериментально подтверждено для разной твердости материала, разных размеров сферы. Эти результаты подтвердили предположение, что при макро КІ стандартными методами ISO 14577-1:2002, существует функция состояния, термомеханический потенциал $U_p = A$ активированного объема материала. Найдена объективная характеристика физико-механическое свойство твердости материала ламинарного КІ.

В работах исследователей [7,8,9] для оценки твердости материала так же использован физический критерий удельной энергии кинетического индентирования. Получены экспериментальные результаты, в которых при одинаковом размере отпечатка практически нет размерного эффекта [9]. Авторы [7] предложили использовать показатель удельной энергии КІ для определения твердости материала. В этих исследованиях анализируется частный случай КІ, отсутствует теоретическое и физическое обобщение свойств данного процесса, нет физического анализа эмпирического метода измерения твердости. В то же время, в этих работах экспериментально подтверждаются наши теоретические предположения и выводы о физической причине размерного эффекта.

4.1 Размерный эффект при измерении макротвердости.

На Рис. 4 а, показаны в обобщенном виде силовые диаграммы $F_n(h, D_n)$ с разной траекторией процесса, диаметр разный, постоянная твердость $HV = \text{const}$. На Рис.4б показаны соответствующие им функции удельной мощности $R_{HI_i}(h, HV_i)$ три значения твердости $HV_1 < HV_2 < HV_3$, три диаметра сферы, использована формула (7). Анализ свойств функций $R_{HI}(h)$, (5) и функций эмпирической твердости $HI(h)$, (6) показал, число твердости для макро индентирования разным по форме **стандартными инденторами** следует находить только для одного установленного эталонного значения h_{st} . При увеличении глубины $h_{st} \rightarrow h_{sx}$, Рис. 4б, происходит пропорциональный рост значений эмпирического числа твердости, меняется масштаб шкалы твердости.

Большому значению глубины h_{sx} , соответствует «растянутая» шкала твердости. Таким образом, число RNI_i материала формально выросло. Шкала с новым масштабом твердости (глубина h_{sx}) показана желтым цветом. Твердость для каждой меры HVi выросла на всех линиях диаграмм RNI_i , аналогично изменится шкала эмпирических диаграмм $NI(h)$. При уменьшении h_{sx} шкала сжимается. В то же время величина физического потенциала твердости $RNM(V)$ данного материала не зависит от h в достаточно большом диапазоне KI , это постоянная физическая характеристика материала, данной формы индентора и достаточно большого интервала глубины h . Этим потенциал твердости $RNM(V)$ отличается от эмпирического или физического **числа на MCJ** физическая твердость RNI_{MCJ} , компонента (7), практически он не зависит от глубины, она равняется потенциалу физической твердости $RNM(V) = RNI_{MCJ} \approx const$. Зеленая линия на Рис.4b.

В современных методах **KI** отсутствует критерий подобия **физических процессов при измерении числа твердости**, это главная причина появления размерного эффекта. В эмпирических методах измерение числа твердости материалов выполняется при разной, не контролируемой величине $X_{SV}(h)$, т.е. в разных физических условиях. Для подобия эмпирических испытаний, сферой, пирамидой, конусом необходимо назначить и соблюдать эталон физико-механического процесса. Для сферы в макро **KI** это постоянная глубина h , не зависимо от диаметра. Индентор в форме усеченного конуса **MCJ** обеспечивал одинаковые физические условия в каждом акте индентирования механически. Если в стандартных методах **макро KI** применить индентор Калверта и Джонсона, он обеспечит физические условия подобия механически, по всему макро диапазону глубины, минимизирует ISE , Рис. 4. Индентор **MCJ** генерирует почти одинаковую удельную площадь контактной поверхности $X_{SV}(h) \approx const$, Рис. 4. При условии $h > h^*$ перемещение индентора в **MCJ** мало влияет на значение макротвердости. Влияние участка релаксации в этом методе мало. В **MCJ**, на протяжении всего процесса вдавливания значение удельной затраченной энергии на формирование поверхности материала приближенно постоянное.

Применение разной глубина перемещения индентора h в одноактных эмпирических стандартных методах измерения числа **макротвердости** сферой и пирамидой приводит к нарушению физических условий подобия. В этом случае измерение твердости сопровождается неконтролируемым переходом в другую шкалу или на другую физическую меру процесса. Число твердости эмпирического метода зависит от h на траектории физического процесса **KI**, то есть число твердости зависит от значения функции $RNI(h)$, (7). Эмпирическая твердость – значение функции компоненты удельной обобщенной мощности индентирования. **Размерный эффект** возникает при нарушении условия подобия формоизменения $X_{SV}(h) = const$.

4.2 Определения физической макротвердости кинетического индентирования.

Термомеханический потенциал индентированного материала $U_p = A(h)$ - функция состояния активированного объема.

Физическая макротвердость материала - $RHM(V, HB)$, размерность J/m^3 , **формулы** (1), (2), (5) различная форма представления, потенциала *удельный обобщенной мощности кинетического-indentирования*, формоизменения активированного объема материала. $RH_i(h, HB_i)$ - функция компоненты потенциала обобщенной удельной мощности-indentирования сферой, компонента градиента потенциала так же это функция эмпирической твердости Рис.3,4. Смысл и размерность эмпирической и физической твердости разный. Формальный перевод размерностей: $[J/m^3 = N/m^2 \times \frac{m}{m}]$. На

Рис.3б две диаграммы, для эмпирической $HI(h)$ и физической $RH(h, HB, D_n)$ макротвердости, $HB411, D5mm$.

На примере индентора Бринелля показан физический смысл и свойства *функции* макро эмпирической твердости KI , формула (7) раскрывает суть числа твердости поверхностного макро-indentирования по стандарту ISO14577. Исследования показали, что методы измерения числа эмпирической макро твердости Бринелля, Роквелла, Виккерса и др. по стандарту ISO14577 некорректны с позиций физической теории твердости. В эмпирических методах нет условия физического подобия измерения числа твердости. Результатом нарушения физического подобия процессов является размерный эффект. В работе [5], на основе физического подхода, рассмотрены методы сопоставления значений твердости из разных методов. Используя зависимости физических методов анализа-indentирования, аналитически построена виртуальная кривая $F(h)$ для пирамиды Виккерса и др. Индентирование моделируется как процесс выполненный сферой с переменным диаметром, для этого задана специальная функция $D(h)$ (динамичный шар Бринелля) и др.

Методы математического моделирования процесса KI , аналитически задана функция формы индентора от h , показали возможности применения физической теории для разработки универсальной программы сопоставления, перевода значений твердости разных стандартов и методов-indentирования.

Нано и микро-indentирование отличается по своей физической природе от процесса макро KI [5]. Активация и формоизменение материала происходят в очень малом объеме тела, нано плотность энергии выше на порядок и более чем в макро диапазонею. В нано процессе своя физическая функция состояния активированного объема [5]. При расширенном диапазоне KI , например, для-indentирования пирамидой Виккерса, возникают последовательно два механизма формоизменения и преобразований. Вклад каждого из механизмов формоизменения тела меняется в процессе KI . Основой теории процесса-indentирования в любом диапазоне остается физическое понятие - удельная мощность, энергия процесса образования активированного объема и контактной поверхности KI [5]. Оценка физической нано-микро твердости методом анализа KI для острого инструмента конус, пирамида, микро и нано сфера, представляет отдельный метод. Физическая диаграмма твердости-indentирования пирамидой, конусом выполняется при помощи собственной физической функции состояния, на этом основании было получено универсальное уравнение-indentирования [3,5], это тема следующей статьи.

4.3 Универсальная физическая единица макро твердости.

Принимая во внимание совершенный теоретический фундамент, заложенный в методе Кальверта – Джонсона, перспективу применения физического анализа результатов КИ, предлагаем применить в стандарте универсальную физическую единицу макро твердости:

$$1.CJ = 1 \cdot 10^7 \text{ J/m}^3$$

1.CJ - один «сај».

Твердость стандартной меры 103НВ приблизительно равна 100CJ физической твердости. Физическая макротвердость конструкционных материалов находится в интервале 1-1000CJ, не зависит от формы индентора. Функция, шкала и значения физической твердости аналитически связаны с функцией и числом эмпирической твердости, для разных методов индентирования. Физические и эмпирические методы могут действовать в новом стандарте параллельно, до отмены эмпирических методов.

5. Выводы.

1. Теоретически обоснованы физические характеристики экспериментального процесса кинетического макро индентирования материала: функция и число физической твердости, определен физический смысл и размерность твердости.
2. Определена функция состояния активированного объема материала для кинетического (инструментального) макро индентирования сферой.
3. На основе аналитического анализа стандартной кинетической силовой диаграммы разработаны методы определения значения физического потенциала макротвердости материала, функции физической кинетической твердости макро индентирования. В методе отсутствует размерный эффект. Универсальные физические характеристики твердости имеют ряд важных преимуществ и могут заменить эмпирические стандартные методы измерения твердости.
4. Показан физический смысл стандартного эмпирического числа макротвердости материала и причина размерного эффекта в методах эмпирическом макро индентирования.
5. Установлена аналитическая связь значений эмпирической и физической твердости кинетического макро индентирования материала. Сформулированы принципы, критерии подобия и аналитический метод сравнения числа твердости материалов для разных размеров, формы инструмента, в диапазоне макро индентирования.
6. Полученные результаты представляют основу для разработки дополнения к действующему стандарту ISO 14577 и создания общей физической теории твердости конструкционных материалов в разных диапазонах.

Литература. Part 2

1. В.И. Мощенок Современные методы определения твёрдости. LAP Lambert. 2019. - 382с.
2. О.А. Каток, Н.П. Рудницкий, В.В. Харченко. Определение твердости по Бринеллю

методом инструментированного индентирования. ХНАДУ Вест. 54.2011.с.23-26.

Новиков И.И. Термодинамика. М. Машиностроение. 1984. -592с.

3. Shtyrov N. 2023. “Physical Macrohardness of the Kinetic Indentation of the Material: Function and Universal Unit of Measure (Part 1) Journal of MechanicsEngineering and Automation 13.p. 1-5

4. И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев Справочник по математике. «Наука», 1965, 608с.

5. Н.А.Штырёв. Физическая теория прочности. Гл.7 . Методы определения физических структурно-энергетических молярных параметров конструкционных материалов. //energydurability.com, 2020.

6. F. Grace Calvert, Richard Johnson. On the hardness of metals and alloys. JFI, volume 67, issue 3, march 1859, pages198-203.

7. P.M. Ogar et al. Application of the curves of kinematic indentation by a sphere to determine materials' mechanical properties. P.M. Ogara, V.A. Tarasovb, A.V. Turchenkoc, I.B. Fedorov. Systems. Methods. Technologies. 2013 № 1 (17) p. 41-47

8. Ю.В. Мильман., К.Э. Гринкевич, П.В. Мордель Энергетическая концепция твердости при инструментальном индентировании // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 1. С. 2-9.

9. Ю.В. Мильман, А.А. Голубенко, С.Н. Дуб. Определение нанотвердости при фиксированном размере отпечатка твердости для устранения масштабного фактора. ISSN 1562-6016. ВАНТ. 2015. №2(96).